

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROMAN MATOUŠEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Roman Matoušek

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie vytavitelného modelu v současnosti

v anglickém jazyce:

Present state of investment casting technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled nejnovějších trendů v technologii vytavitelného modelu z hlediska používaných surovin a zařízení.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše zaměřené na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu se zaměřením na výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku a tepelného zpracování keramické formy před odlitím.

Seznam odborné literatury:

- BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
- CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
- HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství. 2001, č. 10, s. 570–580. ISSN 0037-6825.
- HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.–3.6.2009.
- HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology. Livarski Vestnik. 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
- HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.
- HORÁČEK, M. Accuracy of castings manufactured by the lost wax process. Foundry Trade Journal. 1997, vol. 170, no. 3535, p. 424-429. ISSN 1758-9789.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje nové trendy ve výrobě odlitků pomocí technologie vytavitelného modelu. A to od samotné výroby voskového modelu a keramické skořepiny, vytavování vosku, tepelného zpracování skořepiny až po odlévání a dokončující operace. V úvodní části je představena historie technologie vytavitelného modelu a současná světová výroba pomocí této metody. V následujících kapitolách je postupně popsán celý proces výroby odlitku metodou vytavitelného modelu s důrazem na nové trendy v tomto odvětví. Cílem práce je tedy vypracování literární rešerše zaměřené na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu.

Klíčová slova

Přesné lití, matečná forma, vosk, vytavitelný model, keramická skořepina, vytavování, odlévání, odlitek, rapid prototyping

ABSTRACT

The bachelor thesis describes new trends in manufacturing castings using investment casting technology. Namely from the actual production of wax pattern and ceramic shell, wax smelting, heat treatment of the shell to the casting and finishing operations. In the introductory part the history of technology of investment casting and world production using this method is introduced. The following chapters sequentially describe the whole process by investment casting method with an emphasis on new trends in this industry. The aim of the thesis is to draw up a literary review focused on the most modern equipment and raw materials used in investment casting technology.

Key words

Investment Casting, master die, wax, lost wax, ceramic shell, de-waxing, metal pouring, casting, rapid prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATOUŠEK, Roman. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s., Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Technologie vytavitelného modelu v současnosti* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 30. 5. 2014 v Pucově

.....
Roman Matoušek

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Historie	8
2 Přehled světové výroby a využití odlitků	9
3 Obecný popis technologie vytavitelného modelu	10
4 Výroba voskového modelu	11
4.1 Návrh matečné formy	11
4.1.1 Formy vyráběné obráběním	12
4.1.2 Formy vyráběné podle matečného modelu	12
4.2 Zhotovení voskových modelů	14
4.2.1 Voskové směsi	14
4.2.2 Recyklace vosků	15
4.2.3 Zkoušení vosků	16
4.2.4 Výroba voskových modelů	17
4.2.5 Složení modelové sestavy	17
4.3 Nové trendy ve výrobě voskového modelu	18
4.3.1 Pokročilé metody testování vosků	18
4.3.2 Využití metody Rapid prototyping	20
5 Výroba keramické formy	21
5.1 Materiály	21
5.1.1 Pojiva	21
5.1.2 Žáruvzdorné materiály	22
5.2 Postup výroby skořepiny	22
5.3 Vytavování vosku	23
5.4 Žíhání skořepin	25
5.5 Keramická jádra	25
5.6 Nové trendy v oblasti výroby skořepin	25
5.6.1 Rychle vyrobitelné skořepiny	26
5.6.2 Užití technologie RP na přímou výrobu skořepin a jader	27
6 Odlévání	27
6.1 Klasické lití	28
6.2 Sklopné lití	28
6.3 Tavení a lití ve vakuu	29
6.4 Vakuové nasávání	29
7 Dokončovací operace	30
7.1 Odstraňování keramiky na hrubo	30
7.2 Oddělení odlitků od vtokové soustavy	30
7.3 Odstranění zbylé keramiky	31
7.4 Odstranění vtoků, dokončování	32
7.5 Kontrola odlitků	32
Závěr	33
Seznam obrázků	37
Seznam grafů	37

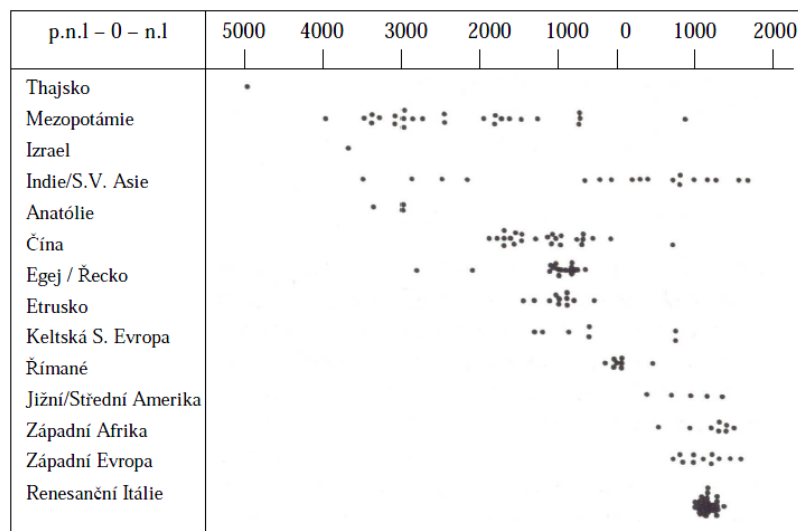
ÚVOD

Výroba přesných odlitků pomocí metody vytavitelného modelu v současnosti představuje moderní technologii v lití kovů. Aspekt přesnosti, vyjádření již v samotném názvu technologie, v sobě zahrnuje jak přesnost rozměrovou, tak také kvalitu povrchu a schopnost vytvoření složitých tvarů požadovaných součástí, kde je část funkčních ploch vyrobena již při lití s takovou drsností povrchu a rozměrovou tolerancí, že není nutné provádět dokončovací operace pomocí obrábění. I v případě zbývajících ploch, které je nutné obrábět, jsou náklady na dokončení zřejmě nižší než u ostatních způsobů lití. Lze tedy vyrábět produkty blízké hotovým výrobkům („near-net-shape“). Přesný odlitek přináší zvýšení užitečných vlastností konečného výrobku a zároveň snížení pracnosti, materiálových nákladů i využití energie.

Cílem předkládané bakalářské práce je popsat proces a technologii odlévání pomocí metody vytavitelného modelu s vyzdvihnutím nejnovějších trendů.

1 HISTORIE [1, 2]

Přesto, že technologie lití na vytavitelný model jak ji známe dnes, je složitý a komplikovaný proces, základní princip této technologie je znám již přes 7000 let. Už v této době obalovali umělci hlínou modely ze včelího vosku. Po vypálení se pak do takto zhotovených forem odléval bronz. Na duté odlitky byla využívána jádra hliněná. Velké množství důkazů svědčících o rozmachu této technologie v období raného novověku bylo nalezeno především v renesanční Itálii (Obr. 1). Historický přehled odlitků vyrobených pomocí technologie vytavitelného modelu je zobrazen v grafu 1.



Graf 1 Historický přehled odlitků technologie vytavitelného modelu [1]

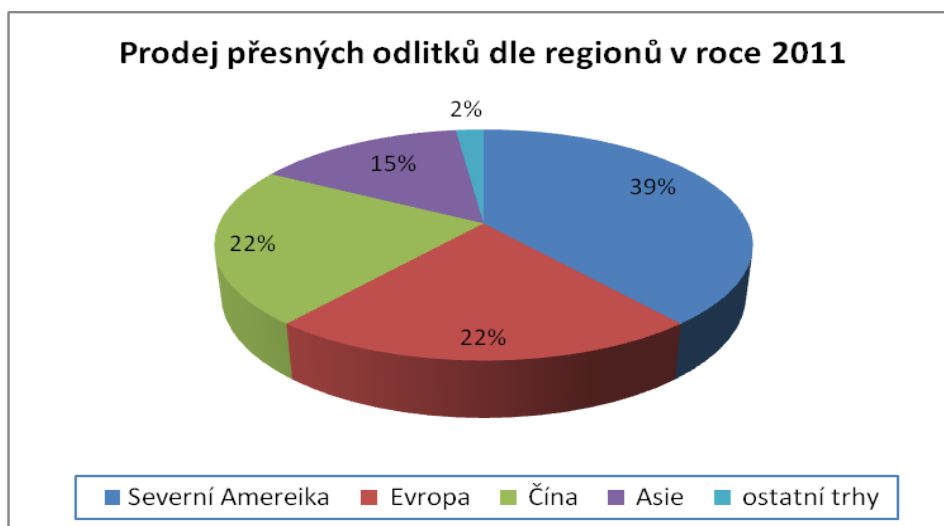
Poté došlo k útlumu a technologie se začala znovu využívat až koncem 19. století a to především v zubní technice a bižuterii. Ve strojírenském průmyslu se metoda vytavitelného modelu začala uplatňovat až s příchodem druhé světové války, a to v souvislosti s požadavky na strojní součásti v leteckém průmyslu. Nejvíce k rozvoji této technologie, která se dnes uplatňuje například i v energetice, leteckém, automobilovém a zbrojním průmyslu, lékařství, elektronice, umění a dalších oborech, dopomohl vývoj oborů, jako je chemie či metalurgie.



Obr. 1 Odlitek hřebenu ze zlata (300g - 4. stol. n. l.) [1]

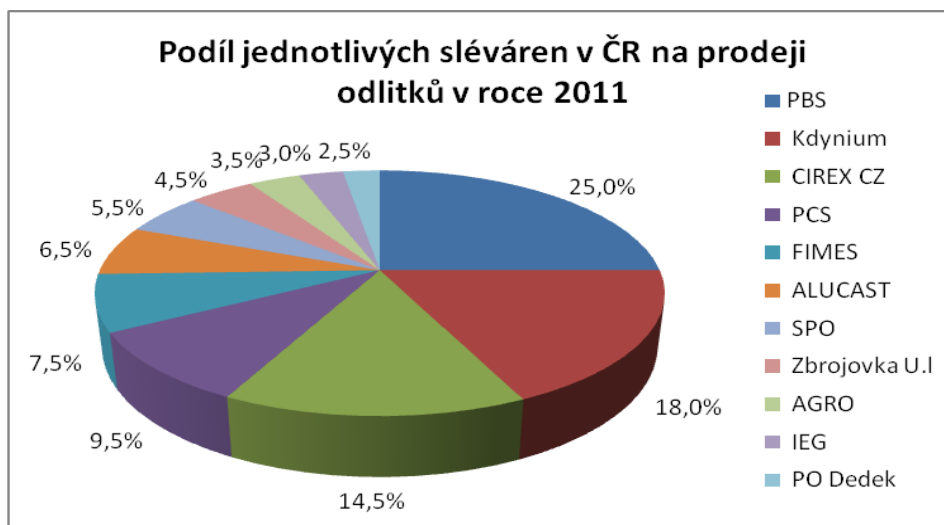
2 PŘEHLED SVĚTOVÉ VÝROBY A VYUŽITÍ ODLITKŮ [3]

Produkce výroby odlitků technologií vytavitelného modelu se neustále zvyšuje. Jedinou výjimkou byl rok 2008, kdy byla výroba ovlivněna celosvětovou ekonomickou krizí. Od té doby pak výroba opět roste a lze předpokládat, že tento vzestupný trend bude pokračovat. Například objednávky v leteckém průmyslu jsou zadány až na 8 let dopředu. Přehled světové výroby podle regionů je vidět v následujícím grafu.



Graf 2 Prodej přesných odlitků podle regionů v roce 2011 [3]

Rozvoj trhu s odlitky zhotovenými pomocí této technologie je vzestupný i v České republice (Podíl jednotlivých sléváren na prodeji odlitků ukazuje graf 3). Obrat pro rok 2010 byl 55 mil. USD (tj. 930 mil. Kč) při 810 zaměstnancích v oboru. Pro rok 2011 pak 58 mil. USD (tj. 1 105 mil. Kč) při 850 zaměstnancích v oboru. Rozdíl nárůstu v USD a Kč je způsoben kolísáním měnového kurzu. V roce 2012 však nastala stagnace, která byla zapříčiněna hlavně špatnou ekonomickou situací v některých zemích EU, zejména v Řecku, Itálii, Španělsku a Portugalsku.



Graf 3 Podíl jednotlivých sléváren v ČR na prodeji odlitků v roce 2011 [3]

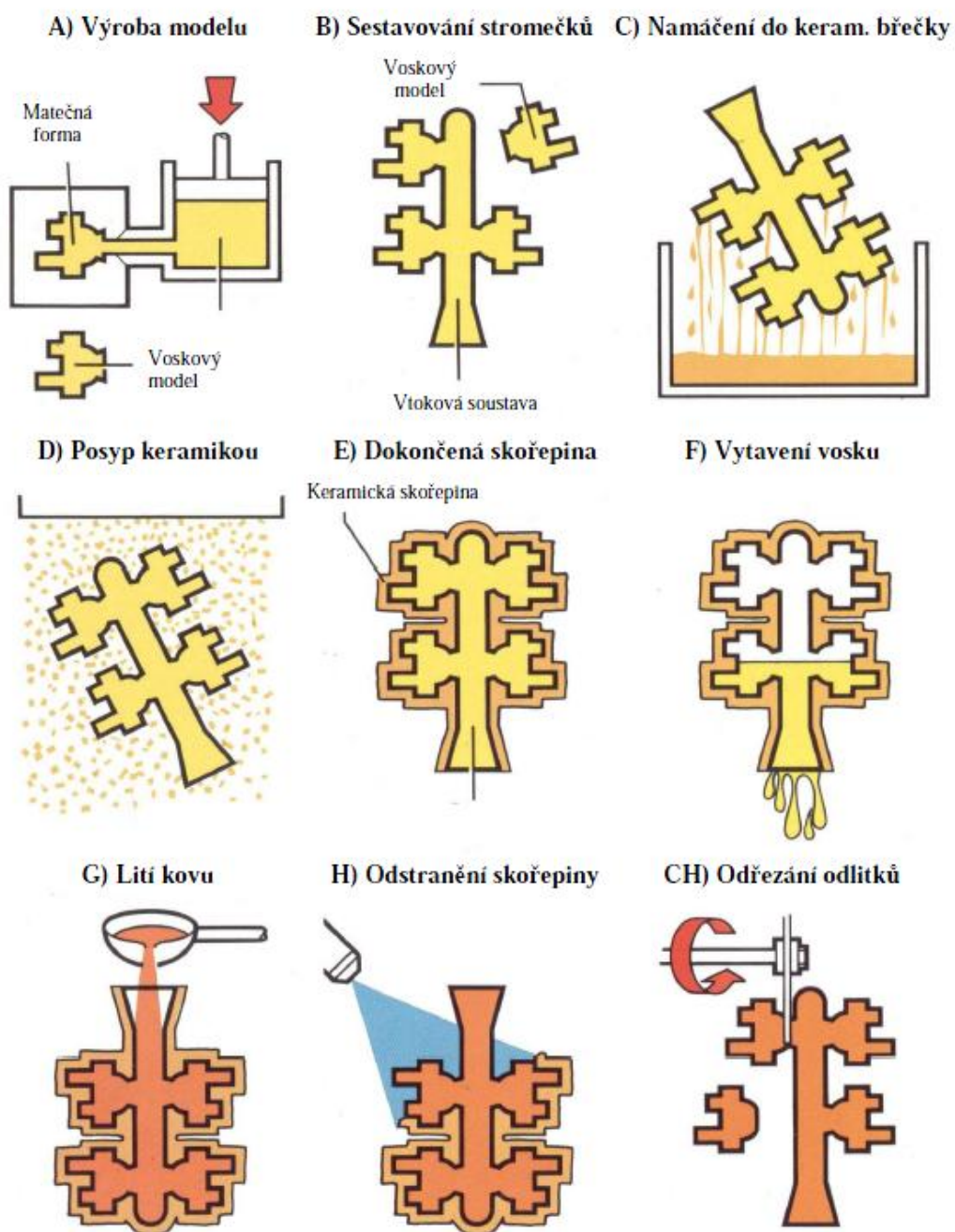
Produkty technologie přesného lití lze nalézt v mnoha odvětvích lidské činnosti (Obr. 3). Mezi nejvýznamnější odběratele výrobků patří zejména letecký, energetický a automobilový průmysl. Dále se přesné odlitky také využívají v lékařství, vojenské technice i pro komerční účely.



Obr. 2 Ukázka odlitků vyrobených technologií vytavitelného modelu [4-10]

3 OBECNÝ POPIS TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU [1, 11]

Lití metodou na vytavitelný model patří mezi metody tzv. přesného lití. To znamená, že se touto metodou dosahuje vysoké rozměrové přesnosti a jakosti povrchu a často už nejsou nutné další technologické operace. Celý proces začíná výrobou matečné formy, ve které se zhotoví voskový model. Tento model se poté připojí ke vtokové soustavě, na kterou bývá většinou připojeno větší množství modelů. Na takto zhotovenou modelovou sestavu se postupným nanášením vrstev keramické hmoty vytvoří skořepina. Po vysušení je vosk ze skořepiny vytaven. Skořepina je následně žíhána, aby získala požadované mechanické vlastnosti. Poté probíhá vlastní lití. Po zchladnutí je keramická forma odstraněna, odlitky odděleny od vtokové soustavy a následují dokončovací operace jako je tryskání, broušení a leštění. Celý proces je znázorněn obrázkem č. 3.



Obr. 3 Stručný přehled operací v technologii vytavitelného modelu [1]

4 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU

4.1 Návrh matečné formy [11, 12]

Výroba matečné formy je první operací v technologii vytavitelného modelu. Tvar formy je shodný s tvarem konečného odlitku a jakákoliv nepřesnost formy pak ovlivní voskový model a tím i keramickou formu. Proto jsou na výrobu matečných forem kladeny velmi vysoké nároky. Forma musí mít velmi kvalitní povrch a přesné rozměry, které se ovšem neshodují s rozměry výsledné součásti. Je nutné si uvědomit, že voskový model při chladnutí mění své rozměry. To platí i pro

keramickou skořepinu a vlastní odlévaný materiál. Je tedy důležité znát všechny faktory výroby, aby forma zachycovala tyto rozměrové změny a bylo dosaženo přesných rozměrů požadovaných zákazníkem. Dále by měla být navržena tak, aby byla doba nutná k setrvání odstříknutých modelů ve formě co nejkratší. Z těchto důvodů má forma velký vliv na výslednou kvalitu a cenu odlitku.

Formy lze dělit podle různých kritérií. Dle účelu použití k výrobě vlastních modelů nebo vtoků, nálitků apod. Dle konstrukce se dělí na formy pro jeden model nebo pro více modelů. Dále podle stupně mechanizace, použitého materiálu a nebo způsobu výroby na obráběné a zhotovené dle matečného modelu. Volba vhodné formy pak závisí na kritériích jako jsou velikost série, rozměry a složitost tvaru odlitku, požadovaná rozměrová přesnost odlitku, náklady na výrobu a tepelné vlastnosti formy nebo na vstřikovacím stroji.

4.1.1 Formy vyráběné obráběním [12]

Obráběné formy jsou nejnákladnější na výrobu (Obr. 4). Jejich výhodou je však vysoká přesnost a dlouhá životnost. To je předurčuje k použití ve velkosériové produkci. Samotná výroba pro jednoduché modely je poměrně nenáročná. Modely složitých tvarů s vnitřními dutinami apod., jejichž osy jsou mimo dělicí rovinu, musí obsahovat jádra, jejichž ustavení ve formě je velmi náročné.

Na výrobu obráběných forem se používají slitiny hliníku a ocel. Výhodou hliníku je snadnější a rychlejší obrábění a díky lepší tepelné vodivosti je výroba modelů rychlejší. Nižší hmotnost pak zaručuje snadnější manipulaci s formou. Výhoda oceli pak spočívá v menší náchylnosti k deformacím a poškození.



Obr. 4 Obráběná forma [8]

4.1.2 Formy vyráběné podle matečného modelu [11, 12, 13, 14]

1) Formy ze silikonového kaučuku

Vyrábí se zalitím matečného modelu silikonovým kaučukem. Mezi výhody patří jak možnost odlít tvarově složitých modelů, tenkostěnných modelů nebo modelů s negativními úkoly, tak také nízká cena. Tento typ formy zaručuje dostatečnou přesnost v řádu desítek voskových modelů, je tedy vhodný pro menší série.

2) Formy z plastických hmot

Výroba spočívá v zalití matečného modelu epoxidovou pryskyřicí nebo dentakrylem. Výhodou je snadná výroba a nízká cena. Tyto formy však nedosahují vysoké přesnosti. Kvůli malé životnosti se hodí pro malosériovou výrobu.

3) Formy ze sádry

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu sádrou. Používají se pro výrobu jednotlivých modelů často k ověření navržené technologie z důvodu minimální životnosti a nízké přesnosti. Plnění formy probíhá pouze volným gravitačním litím.

4) Formy z nízkotavitelných slitin

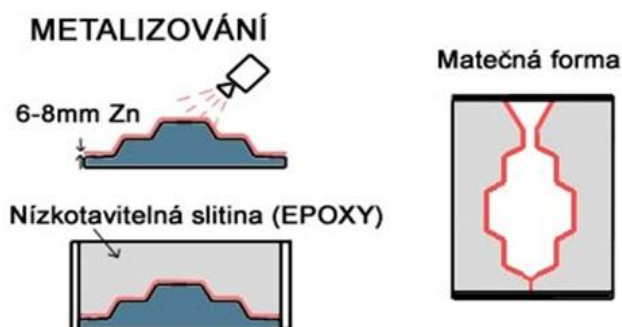
Jsou vyráběny zalitím kovového matečného modelu nízkotavitelnou slitinou. Z druhé strany je model usazen v ocelovém plášti. Mezi výhody patří rychlá a snadná výroba, dobrá jakost povrchu a rozměrová přesnost. Kvůli nízké životnosti jsou vhodné pouze pro malosériovou výrobu.

5) Formy ze zinkových slitin

Jsou vyráběny stejným způsobem jako formy z nízkotavitelných slitin. Rozdíl je pouze v použité slitině. Oproti předchozím formám jsou však tvrdší a trvanlivější, jsou tedy vhodné pro větší série.

6) Formy vyráběné metalizací

Princip výroby těchto forem spočívá v metání roztavených částic kovu metalizační pistolí na matečný model (Obr. 5). Tyto tekuté částice postupně vytváří souvislou vrstvu přesně kopírující tvar modelu. Proces končí po dosažení přibližně 3 mm silné vrstvy. Výsledná skořepina je zalita epoxidovou pryskyřicí. Tyto formy se uplatní tam, kde jsou zapotřebí velmi komplikované dělicí roviny. Mezi další výhody patří rychlá, levná výroba a velmi vysoká životnost. Nevýhodou je obtížná úprava formy.

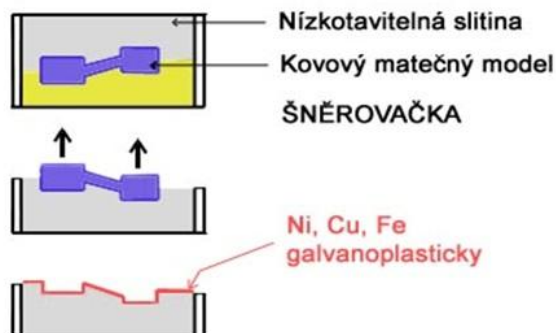


Obr. 5 Princip výroby formy metalizací [15]

7) Formy vyráběné galvanoplasticky

Princip výroby je založen na elektrolýze. Matečný model je ponořen v galvanické lázni, kde se na něm postupně utvoří skořepina z niklu mědi nebo železa. Tloušťka stěny se pohybuje mezi 0,4 - 4mm. Takto vyrobená skořepina je následně zalita epoxidovou pryskyřicí nebo slitinou hliníku podobně jako u metalizovaných forem (Obr. 6). Touto metodou lze vyrobit komplikované, velmi přesné formy, které není možné vyrobit žádnou obráběcí metodou.

GALVANOPLASTIKA



Obr. 6 Princip výroby formy galvanoplastikou [15]

4.2 Zhotovení voskových modelů [16]

Pomineme-li problematiku výroby matečné formy, je kvalitní voskový model jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující kvalitu výsledného odlitku. Pokud nebude model dosahovat potřebné jakosti, není již možné vyrobit kvalitní odlitek i v případě, že by byl zbytek procesu zcela bezchybný. Z tohoto důvodu je problematika vosků a modelů velmi důležitá.

4.2.1 Voskové směsi [17]

V dnešní době se voskové směsi skládají z velkého množství složek (Obr. 7). To proto, aby bylo možné splnit náročné požadavky na jejich konečné vlastnosti. Mezi složky voskových směsí patří přírodní uhlovodíkové vosky, přírodní esterové vosky, přírodní a syntetické pryskyřice, syntetické vosky, organická plniva a voda.

Pokud vezmeme v úvahu množství složek, které vosková směs obsahuje, je zřejmé, že chování těchto směsí je složitou záležitostí. „Výsledná směs se chová jako heterogenní sloučenina, nelze ji tedy například charakterizovat jednou hodnotou teploty tání.“ [9]

Požadované vlastnosti voskových směsí jsou: minimální tepelná roztažnost, vysoká pevnost, vosk by se neměl lepit na stěny formy, měl by tvořit čistý hladký povrch a přesně reprodukovat stěny formy, chemická odolnost proti keramické břečce, vysoká smáčivost při kontaktu s břečkou. Dále by měl obsahovat minimum popela, doba tuhnutí ve formě by měla být co nejkratší a směsi by měly být dobře recyklovatelné.



Obr. 7 Voskové směsi [18]

Rozdělení voskových směsí [17]

Vosky na modely:

- **Neplněné vosky (přímé):**

Mezi výhody těchto vosků patří nízký obsah popela, vysoká kvalita povrchu, snadná regenerace a rekonstituce, navíc je možné je odstříkovat v širokém rozsahu teplot. Modely z těchto vosků však mohou trpět častým výskytem propadlin v oblastech nahromadění materiálu. Tento problém lze omezit intenzivnějším chlazením forem nebo lokálním užitím voskových jader.

- **Emulzifikované vosky:**

Tyto vosky jsou vlastnostmi velmi podobné neplněným voskům. Obsahují však „plnivo“, vodu nebo vzduch, které snižuje výskyt propadlin a zvyšuje rozměrovou stabilitu vosků. Obsah těchto plniv (emulzifikátorů) se pohybuje mezi 7-12%. Výroba modelů obvykle probíhá za nižších vstřikovacích tlaků.

- **Plněné vosky:**

V současnosti jsou nejpoužívanějšími modelovými vosky. Obsahují organické plnivo v podobě prášku, který je ve vosku nerozpustný. Obsah plniva se pohybuje mezi 20-40%. Díky němu má model lepší rozměrovou stabilitu a povrch modelu se méně propadá. Tyto vosky jsou vhodné pro složité tenkostěnné modely.

Vosky na vtoky:

Složením velmi podobné neplněným modelovým voskům, mají však vyšší pevnost, aby byly schopny unést samotné modely. Na vtokové soustavy se používají také regenerované přímé vosky.

Vodou rozpustné vosky:

Používají se na výrobu voskových jader. Jsou rozpustné ve vodě nebo slabých kyselinách. „*Poměrně dobře se odstříkují, mají dobrou rozměrovou stabilitu a malý sklon k propadání povrchu.*“ [17]

Speciální vosky:

- **Vosky na lepení:**

Základní vlastností těchto vosků je vysoká adheze. Používají se především na lepení modelů.

- **Namáčecí vosky:**

„*Voskové směsi s nízkou viskozitou určené pro zmenšení nebezpečí vzniku trhlin u skořepin při vytavování vosku v autoklávu.*“ [17]

- **Vosky na opravy:**

Pomocí těchto vosků se opravují poškozené modely.

4.2.2 Recyklace vosků [17]

Po použití ztrácí vosková směs požadované vlastnosti a nelze ji tedy použít znovu. Je však možné použitou směs recyklovat a její vlastnosti tak obnovit. Toto

řešení je oproti použití nové směsi ekonomicky výhodné i šetrné k životnímu prostředí. Pro tento účel lze využít dva procesy:

- **Regenerace:**

Při regeneraci dochází pouze k částečné obnově technologických vlastností. Regenerovaný vosk je vhodný pouze pro výrobu vtokových soustav.

- **Rekonstituce:**

Pokročilý proces při kterém dochází téměř k úplné obnově technologických vlastností. Při tomto procesu je nutné do vosku přidat nové suroviny. Rozměrová přesnost je takřka totožná s panenským voskem. Rekonstituovaný vosk je vhodný i na výrobu modelů.

4.2.3 Zkoušení vosků [17]

Zkoušení voskových směsí je velice důležité. Pomocí různých zkoušek zjistíme, zda má vosk požadované vlastnosti a jestli je vhodný pro danou situaci.

Stručný popis zkoušených vlastností:

1) **Bod skápnutí:**

Bod skápnutí je teplota při níž dochází ke změně skupenství vosku z pevného na kapalné. Znalost této hodnoty je důležitá především kvůli vytavování vosku ze skořepiny.

2) **Bod tuhnutí:**

Bod tuhnutí je teplota, při které přestává vosk téci pod vlivem gravitace. Tato hodnota je důležitá zejména z hlediska vstřikovacích vlastností.

3) **Viskozita:**

Hodnota viskozity určuje, jak snadno vosk teče. Viskozita je závislá na teplotě. Obvykle se viskozita zjišťuje za teploty, při níž se vosk vstřikuje do formy.

4) **Zabíhavost:**

Při zkoušce zabíhavosti je vosk při známých parametrech vstříknut do speciální spirálové formy. Zkouška se vyhodnocuje podle toho, jak daleko vosk doteče.

5) **Penetrace:**

Jedná se o měření tvrdosti. Vyhodnocuje se hloubka díry po vniku jehly daných rozměrů kolmo do povrchu voskového vzorku. Test probíhá při dané teplotě, velikosti zatížení a délce trvání.

6) **Statická zkouška ohybem:**

Tato zkouška je důležitá z hlediska manipulace s voskovým modelem. Mechanické vlastnosti se projeví při vyjímání modelu z formy, sestavování do stromečku a obalování.

7) **Rozměrová analýza – smrštění:**

Rozměrová analýza je zkouška zjišťující rozměrové změny vosku po odstříknutí. Tuto hodnotu ovlivňuje jak vlastnost samotného vosku, tak i parametry

vstřikování. Za ideální se považuje co nejmenší hodnota smrštění. Největší vliv na smrštění má obsah plniva, čím je obsah plniva větší, tím klesá smrštění.

8) Obsah popela:

Pomocí této zkoušky se zjišťuje procentuální obsah nespalitelných látek ve vosku. Vysoký obsah popelovin ve vosku je příčinou viditelných defektů na voskových modelech. „Maximální obsah popela pro účely přesného lití byl stanoven na 0,05%.“ [17]

4.2.4 Výroba voskových modelů [1, 11, 12]

Samotná výroba voskových modelů spočívá v odlití vosku do matečné formy. To se provádí gravitačním litím nebo vstřikováním. Gravitační lití modelů se používá jen zřídka a většinou na výrobu pomocných modelů (např. vtokové kanály atd.). Samotné vstřikování je velmi důležitá a kontrolovaná operace. Vstřikovací parametry jako jsou teplota vosku, vstřikovací tlak, rychlost plnění, doba dotlaku, tvar a zaústění vtoku, mají vliv na konečné rozměry voskového modelu a jsou prakticky jedinou možností řízeného ovlivnění polohy tolerančního pole konečného odlitku. Tento proces se provádí na speciálních vstřikovacích lisech (Obr. 8). Ty vstřikují roztavený vosk, jehož teplota se pohybuje v rozmezí 55 – 90 °C pod tlakem do formy. Formy bývají ošetřeny separátorem, který zabraňuje nalepování vosku na stěny a usnadňuje vyjímání modelů. Poté, co vosk ve formě zchladne a ztuhne, je model vyjmut a očištěn od případných otřepů z dělicí roviny. Před tím, než se model složí do modelové sestavy, musí se nechat „vyzrát“ (stabilizace). Tento proces trvá minimálně 24 hodin.



Obr. 8 Vstřikovací lis [19]

4.2.5 Složení modelové sestavy [11, 12]

Hotové modely se po stabilizaci musí složit do modelových sestav. Ty se skládají z vtokové popřípadě i nálitkové soustavy. Připojování modelů k soustavě se provádí dvěma způsoby, a to pájením nebo lepením. Princip pájení spočívá v natavení dosedacích ploch modelu i vtokového systému. Poté se pájedlo z místa styku vytáhne a model se přitlačí k vtokovému systému. Při lepení se na stykové plochy nanáší roztavené lepidlo.

Licí soustava může obsahovat jeden model nebo se skládá větší množství modelů do tzv. stromečků.

- **Sestavování jednotlivých modelů:**

Používá se u větších a hmotnějších odlitků, kde hmotnost přesahuje 2 kg nebo u tvarově složitých odlitků, kde jsou kladeny velké nároky na kvalitu a rozměrovou přesnost (Obr. 9).



Obr. 9 Model lopatkového kola s vtokem [8]

- **Sestavování do stromečků:**

Do stromečku se skládá větší množství menších modelů navzájem spojených vtokovou soustavou (Obr. 10 a 11). Základním předpokladem při sestavování stromečku je, aby při pozdější operaci vytavování mohl všechen vosk ze stromečku bez problémů vytéct. V případě, že stromeček nejde vhodně sestavit, aby došlo k bezproblémovému odstranění vosku, je nutné k modelu připojit pomocný výfuk. Pokud ani pomocný výfuk nestačí, je potřeba vytvořit na vhodných místech stromečku pomocné výtokové otvory. Po vytavení vosku je nutno výtokové otvory důkladně zatmelit. Dále musí být stromeček sestaven tak, aby byl k připojovaným modelům dobrý přístup a nevznikalo riziko poškození již připevněných modelů. Modely by měly být také umístěny tak, aby nedocházelo k nestejnomyšlnému usazování obalové hmoty v dutinách, což by vedlo k nerovnoměrnému chladnutí. Modely mezi sebou musí mít dostatečnou vzdálenost, aby se skořepina mezi jednotlivými modely nedotýkala.



Obr. 10 a 11 Ukázky stromečků [8]

4.3 Nové trendy ve výrobě voskového modelu

4.3.1 Pokročilé metody testování vosků [20]

Neustálý pokrok technologie vytavitelného modelu se projeví i u testování voskových směsí. Zvláště požadavky z oblasti leteckého průmyslu a energetiky nutí výrobce vosků investovat do nových moderních laboratorních zařízení i do kvalifikovaného personálu.

Pokrokové metody zkoušení vosků:

1) Fourierovo transformační infra-červené záření (FTIR):

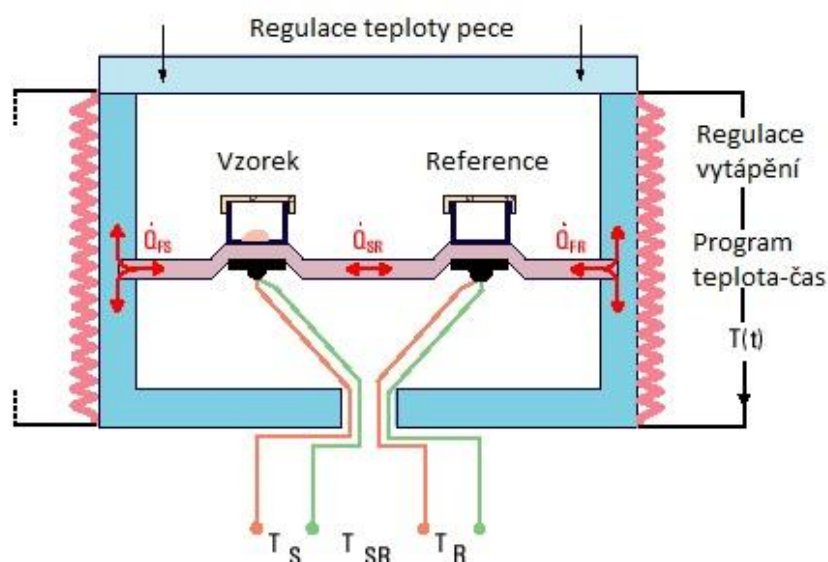
Princip tohoto testu je založen na porovnávání frekvence rozděleného světelného paprsku. Jeden jde přímo do snímače, druhý prochází testovaným

vzorkem. Poté je vyhodnocen rozdíl charakterizující vzorek, který je zaznamenán. Tento test je velice rychlý, ale je založen na srovnávací metodě. Vyžaduje tedy kvalifikovaného pracovníka a databázi dříve naměřených vzorků, se kterými je možné porovnávat.

2) Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC):

Test spočívá v regulovaném ohřevu dvou kelímků na společném ohříváči. Vzhledem k přítomnosti vzorků budou kelímky energii pohlcovat různou rychlostí. (Obr. 12) Tento rozdíl je vyhodnocen programem, který vytvoří závislost zvanou DSC křivka. Poté jsou kelímky kontrolovaně ochlazovány, vyhodnotí se tak exotermické chování zkoušených vzorků.

Výstupem této zkoušky jsou konkrétní hodnoty, nevyžaduje tedy porovnání s jinými vzorky. Pomocí této zkoušky se zjišťují informace jako absorbovaná nebo naopak vydaná energie potřebná na roztavení/ztuhnutí voskové směsi (latentní teplo), teploty při kterých se taví jednotlivé složky směsi, a další informace z oblasti krystalizace.



Obr. 12 Schéma DSC [21]

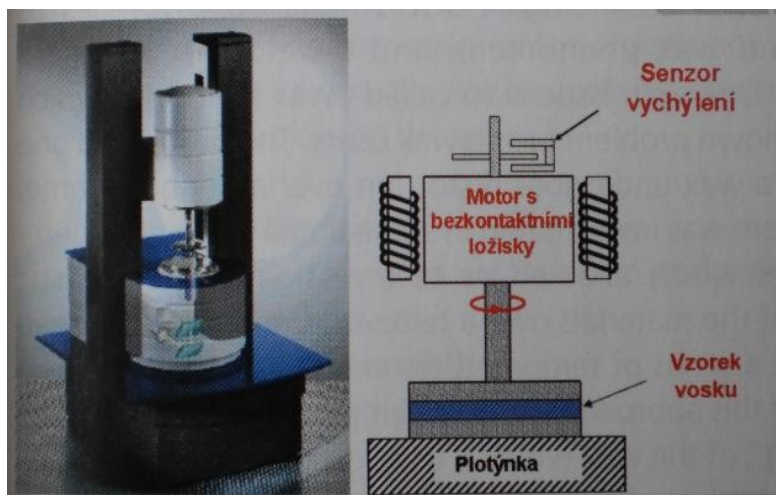
3) Reometrie:

Zkouška probíhá na reometru, který může být s kontrolovaným smykovým napětím nebo smykovou deformací. Roztavený vzorek je umístěn mezi vyhřívanou plotýnkou, která zajišťuje správnou teplotu vzorku a vřeteno aplikující deformaci (Obr. 13). Testovaný vzorek je vystavován deformaci kroutícím momentem, jenž má sinusový průběh. V průběhu se postupně snižuje teplota. Zařízení reguluje kroutící moment, aby se zachovala požadovaná smyková rychlost. Zkouška je zdánlivě podobná zkoušce viskozity. Na rozdíl od ní však reometrie neporušuje strukturu vosku a probíhá za nižších teplot.

Vzhledem k širokým možnostem vstupních parametrů je i možnost získaných informací velice rozsáhlá, jejich správné vyhodnocení tedy vyžaduje kvalifikaci i zkušenosti. Navíc měření bývá užíváno k porovnávání směsí mezi sebou, nikoliv pro určování absolutních hodnot.

Výsledkem této zkoušky jsou informace o reologických vlastnostech zkoumaných látek, tedy jak vzorky reagují na aplikované silové zatížení. „Zjišťování

chování vosku ve stavu polotekutém až pevném podává informaci o průběhu tuhnutí voskové směsi, změnách fází a visko-elastické pevnosti v závislosti na teplotě.“ [20]



Obr. 13 Schéma reometrie [20]

4.3.2 Využití metody Rapid prototyping [22, 23]

Rapid prototyping (RP) je označení pro technologii, která vytváří fyzické předměty na základě 3D dat. Tato data často vznikají v počítačových systémech CAD, jako jsou Inventor, Catia nebo Solidworks. Princip této technologie spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev materiálu odpovídajících průřezu vyráběného předmětu. Výhoda této metody spočívá v nezávislosti stavby modelu na jeho tvaru a složitosti geometrie. Technologie RP je vhodná pro výrobu vzorkových sérií pro funkční zkoušky, ověřování vlastností navržených dílů a pro malosériovou a prototypovou výrobu.

Přímá výroba vytavitelných modelů pomocí RP [22, 23, 24]

V dnešní době se na výrobu vytavitelných modelů používá několik odlišných RP technologií.

Stereolitografie (SL) - je jednou z prvních metod RP. Její princip je založen na postupném vytvrzování vrstev pryskyřice s pomocí laseru. Modely využívané pro potřeby technologie vytavitelného modelu jsou z epoxidové pryskyřice s jsou duté (voštinové). Během vypalování pak modely rychle ztrácejí svoji tuhost a tím se snižuje riziko poškození formy. Mezi výhody této technologie patří dobrá kvalita povrchu a vysoká přesnost. Nevýhoda je nemožnost vytvářet stěny o menší tloušťce než je 2,5 mm.

Sintrace laserem (LS – Laser Sintering) - metoda spočívá v nanesení tenké vrstvy práškového materiálu, který je následně nataven laserem, aby došlo ke spojení s již zhotovenou vrstvou. Okolí zhotovených vrstev je obklopeno nezpracovaným práškovým materiálem, který má funkci podpory. Pro metodu vytavitelného modelu se používá polystyrenový prášek. I přes skutečnost, že tyto modely postrádají skutečně ostré detaily, má tato metoda své výhody především možnost vyrábět tenkostěnné modely.

Multi Jet Modeling (MJM) – metoda založená na bázi „tisku“. Výroba voskového modelu probíhá „tiskem“ roztavených kapek pomocí tiskových hlav, které zabírají celou šířku stavební plochy najednou. Výhody této metody jsou nízké investiční náklady, vysoká rychlost výroby a kvalitní povrch.

Fused Deposition Modelling (FDM) – principem metody je kontinuální dodávání materiálu ve formě drátu do nanášecí hlavy. Zde je materiál roztaven

a tlačení skrze tenkou trysku na předchozí vrstvy, kde okamžitě tuhne. Pro účely přesného lití se jako materiály modelů používají vosk a ABS. Voskové modely jsou velmi křehké a robustnější, avšak mohou se vytavovat v autoklávu. Oproti tomu modely z ABS mohou být tenkostěnné a dosahují vyšší kvality povrchu a pevnosti. Nevýhodou je nutnost vytavování v žíhací peci a produkce velkého množství popela.

I přes zmíněné nedokonalosti RP technologií se díky neustále se snižujícím pořizovacím a provozním nákladům a nové generaci vysokorychlostních „tiskových“ strojů očekává velký pokrok v přesnosti i rychlosti výroby, který by měl přispět k dalšímu rozšiřování této technologie.

Nepřímá výroba vytavitelných modelů pomocí RP [14, 22]

Technologii RP lze také použít na výrobu matečného modelu. Smyslem této technologie je poskytnout slévárně možnost zajistit zákazníkům rychle nabídku prototypových odlitků. Není tedy vhodná pro větší série. Její výhoda naopak spočívá v rychlé výrobě matečného modelu na základě 3D dat. Podle takto zhotoveného modelu se vyrobí matečná silikonová forma. Pomocí formy se zhotoví voskový model a technologie pokračuje běžným způsobem.

5 VÝROBA KERAMICKÉ FORMY [25]

Samonosná nedělená keramická skořepina je typickým znakem metody lití na vytavitelný model. Forma se zhotovuje obalováním voskového modelu, který je následně zničen vytavením. Skořepina by měla mít co nejvyšší pevnost, a to i za vysokých teplot, vhodnou prodyšnost a reakce na rozhraní forma-kov by měla být co nejmenší.

5.1 Materiály [25]

Keramická forma se skládá ze tří základních složek a to pojiva a plniva (moučky), které dohromady s dalšími aditivami tvoří obalovou hmotu neboli břečku a posypového materiálu (ostřiva). Materiály mouček a ostřiv jsou stejné a se jednotně nazývají žáruvzdorné materiály. Pro konkrétní skořepinu však tyto materiály mohou, ale i nemusí být totožné.

5.1.1 Pojiva [26]

Pojivo neboli vazná kapalina tvoří společně s plnivem obalovou hmotu, do které se namáčí voskový model. Pojivo musí dodat formě potřebnou pevnost jak po vysušení, tak i po vyžhání. Při žhání skořepiny pak také musí být netečné k posypovému materiálu i odlévanému kovu. Nesmí snižovat žáruvzdornost formy získanou plnivem. Zpravidla se používají dva základní typy pojiv: na bázi alkoholu (alkosoly) a na bázi vody (hydrosoly).

Mezi výhody alkosolů patří dobrá pevnost skořepiny před vyžháním, tenké vrstvy keramické suspenze a rychlé sušení skořepiny. Naopak nevýhodou je jejich nepříznivý vliv na životní prostředí, zhoršení pracovních podmínek pro zaměstnance, krátká životnost keramické suspenze a náročnost na testování. Důležité je také zajistit nevybušnost prostředí.

Výhodami hydrosolů jsou nízké náklady, jednoduché testování a použití a šetrnost k životnímu prostředí. Nevýhodou je citlivost na změny pH a dlouhé časy sušení skořepin. I přesto se v praxi díky vyšší pevnosti a menšímu sklonu k praskání lícniho obalu používají převážně hydrosoly.

5.1.2 Žáruvzdorné materiály [25, 26, 27]

Žáruvzdorné materiály jsou nekovové anorganické materiály ve formě mouček nebo posypových materiálů. Právě žáruvzdorný materiál se velkou měrou podílí na konečných vlastnostech skořepiny. Výběr vhodného žáruvzdorného materiálu závisí na následujících vlastnostech:

- tepelná roztažnost
- žáruvzdornost
- chemická netečnost vůči odlévanému materiálu
- cena
- dostupnost.

Tavený křemen

Tavený křemen (modifikace oxidu křemičitého) je uměle vyrobený materiál. Jeho důležitou vlastností je velice nízká tepelná roztažnost, díky níž je odolný vůči tepelným šokům. Mezi další výhody patří nízká hustota a zvýšená prodyšnost. Využívá se jak ve formě moučky tak jako posypový materiál.

Zirkon

Zirkon je přírodní materiál. Dokáže odolávat vysokým teplotám (až 2200°C) a má vysokou tepelnou vodivost. Velkou výhodou je také nízká reaktivnost vůči odlévanému kovu. Používá se jak ve formě mouček tak také ve formě posypového materiálu. Kvůli vysoké ceně se však jeho využití omezuje pouze na primární obaly náročnějších odlitků.

Korund

Korund má podobně jako zirkon velmi nízkou reaktivnost vůči odlévanému kovu. Mezi další výhody patří vysoká tvrdost žáruvzdornost a tepelná vodivost. Nevýhodou je náchylnost k tepelným šokům. Používá se jako moučka i posypový materiál.

Aluminosilikáty

Aluminosilikáty jsou tvořeny dvěma základními složkami, a to oxidem hlinitým a oxidem křemičitým. Mají středně velkou tepelnou roztažnost a vyšší hmotnost. Velkou výhodou je příznivá cena. Mezi aluminosilikáty se řadí např.: molochit, tavený mullit nebo mulgrain. Používají se ve formě moučky i posypového materiálu.

Křemen

Křemen bez jakékoliv úpravy je přírodní materiál. Je velice levný, ale obsahuje značné množství nečistot. Používá se tedy na méně náročné odlitky. Další nevýhodou je jeho velká tepelná roztažnost a je náchylný na teplotní šoky. Používá se jako moučka i posypový materiál.

5.2 Postup výroby skořepiny [11, 15, 28]

Prvním krokem, který předchází vlastní výrobě skořepiny, je příprava modelové sestavy. Ta spočívá v důkladném odstranění zbylého dělicího prostředku z povrchu sestavy. V případě špatného očištění by první obal na vosk dokonale nepřilnul, což by vedlo k popraskání nebo odlupování vysušeného obalu.

Následuje namáčení do obalové hmoty. To probíhá za neustálého naklánění a otáčení, aby obalová hmota pokryla stromeček rovnoměrně a nevznikaly vzduchové polštáře a bubliny v oblastech rohů, koutů a drážek. I po vyjmutí z obalové hmoty se se sestavou neustále pohybuje, aby se docílilo stejnoměrného rozdělení obalové

hmoty. Přebytková obalová hmota mezitím odkape (Obr. 14). První obal je atypický v tom, že se namáčí do řidší obalové hmoty a odkapávání trvá kratší dobu. Dále se dbá na to, aby jednotlivé vrstvy měly přibližně stejnou tloušťku.

Po namáčení a odkapání se stromeček posype žáruvzdorným materiálem. To se provádí sprchovým nebo fluidním posypem. Při sprchovém posypu se stromeček obalí proudem volně padajícího materiálu. Princip fluidního posypu spočívá v ponořování stromečku do posypového materiálu načechrávaného proudem vzduchu. První dva obaly rozhodují o kvalitě povrchu budoucího odlitku, proto se při jejich výrobě užívá posypový materiál s nižší zrnitostí, obvykle 0,175 až 0,25 mm, na zbylé obaly pak 0,25 až 0,5 mm.

Posledním krokem je sušení. Tento proces probíhá v klimatizovaném prostoru o teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ a při relativní vlhkosti 30 až 60% za neustálého proudění vzduchu po dobu 2 – 4 hodin (Obr. 15). Hodnoty závisí na použitém druhu pojiva a žáruvzdorného materiálu při výrobě skořepiny nebo pořadí obalu. Všeobecně platí, že sušení skořepin s pojivem na vodní bázi vyžaduje nižší hodnotu relativní vlhkosti, naopak při použití pojiva na bázi alkoholu je hodnota relativní vlhkosti vyšší. Dále sušení primárních obalů probíhá při vyšších hodnotách relativní vlhkosti. Proces tedy trvá déle a snižuje se nebezpečí poškození formy. Rychlost proudění vzduchu se pohybuje kolem 0,5-1m/s a proud by neměl mířit přímo na skořepiny. Při sušení sekundárních vrstev je relativní vlhkost nižší a rychlost proudění vzduchu je okolo 2,5-5m/s. Proces tedy trvá kratší dobu.



Obr. 14 Namáčení stromečku [19]



Obr. 15 Sušení skořepin [8]

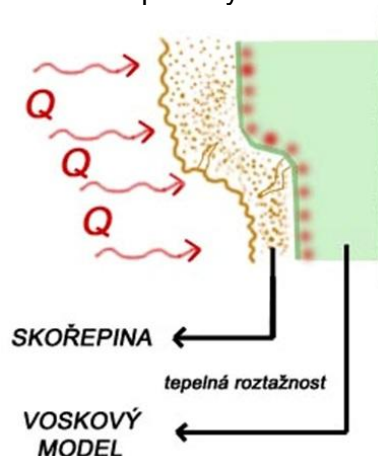
Tento proces namáčení-posypání-sušení se opakuje, dokud není dosaženo potřebného počtu vrstev, který se běžně pohybuje mezi 8 až 12 dle požadované pevnosti formy. Větší počet vrstev se nanáší u větších a těžších odlitků.

5.3 Vytavování vosku [11, 29]

Po nanesení a dokonalém vysušení poslední vrstvy skořepiny je třeba odstranit voskový model. Keramická skořepina se zahřeje a vosk poté vyteče. Vytavený vosk podstoupí proces regenerace či rekonstituce a je znovu použit na výrobu nových modelů, vtoků apod..

Zásadním problémem je rozdílná tepelná roztažnost voskových směsí a keramické skořepiny. Kvůli větší roztažnosti vosku hrozí při vytavování popraskání skořepiny. Řešením tohoto problému je vytvoření tzv. dilatační spáry, která

je vytvořena rychlým ohřevem skořepiny neboli tepelným šokem (Obr. 16). Tímto způsobem se nataví tenká vrstva vosku přiléhající na skořepinu, která zachytí rozměrové změny vosku. Dilatační spára by měla vzniknout po celé ploše skořepiny.



Obr. 16 Dilatační spára [8]

Vytavování vosku se provádí několika různými způsoby [15, 26, 27]:

Vytavování v autoklávu - v současné době nejpoužívanější metoda. Ohřev skořepiny je zajištěn sytou vodní párou o teplotě 160-170°C. Celý proces se odehrává v uzavřené tlakové nádobě (Obr. 17). Během 4-5 sekund je v nádobě dosaženo tlaku 6-8 atm, který je následně řízenou rychlostí snižován. Výhodami této metody jsou snadnost sběru vytaveného vosku, vysoká účinnost a ideální vlastnosti páry pro přenos tepla.



Obr. 17 Bojlerkláv [8]

Vytavování za vysoké teploty – vytavování probíhá při teplotě 750-1100°C a skořepina je zároveň žíhána. Nevýhodou je částečné znehodnocení a ztráta voskové směsi (10-15%).

Vytavování mikrovlnným ohřevem – nově vyvíjená metoda. Postup spočívá v navlhčení skořepiny vodou, která je následně vložena do mikrovlnného pole. Skořepina se poté rychle zahřeje, dojde k vytvoření dilatační spáry a vosk se vytaví. Výhodou tohoto postupu je rychlost, rovnoměrný ohřev celé skořepiny, nedochází ke znehodnocování vosku a lze ji automatizovat.

5.4 Žihání skořepin [26, 27]

Následující operací je žihání skořepiny. Obecně se uvádí tři důvody pro tuto technologickou operaci:

1. **Dosažení požadovaných vlastností skořepiny** – za vysoké teploty (900-1100°C) dochází k převedení amorfnní formy vazné vrstvičky SiO₂ na formu krystalickou, což vede ke zvýšení pevnosti a tvrdosti skořepiny.
2. **Odstranění nežádoucích zbytkových materiálů** – jedná se zejména o vosk zbylý po vytavování a vodu obsaženou v pojivu (alkoholové složky mizí již při teplotách do 100°C).
3. **Předeheř skořepiny před odléváním** – odlévání do předeřáté formy podporuje zabíhavost kovu a brání jeho okamžité krystalizaci na stěně formy.

Samotný proces žihání je závislý na vlastnostech použitého keramického materiálu a typu odlévané slitiny. Základním parametrem je koeficient tepelné roztažnosti keramického materiálu skořepiny. Při nízkých hodnotách koeficientu není skořepina náchylná k tepelným šokům a je tedy možné vkládat ji do pece s vyšší teplotou. Mezi takovéto materiály patří tavený křemen s vůbec nejnižší tepelnou roztažností dále pak zirkon, molochit, a mulgrain. Naopak při vyšších hodnotách koeficientu je nutný pozvolný ohřev skořepiny, aby nedocházelo k jejímu praskání a odlupování jednotlivých vrstev. Mezi tyto materiály se řadí korund a neupravovaný křemen.

5.5 Keramická jádra [12]

Formy s úzkými dlouhými otvory a hlubokými drážkami jsou klasickou metodou obalování nevyrobitelné. Důvodem je nemožnost v těchto místech dosáhnout rovnoměrných vrstev. Nahromaděná obalová hmota v otvorech nemůže ve stanovené době dostatečně uschnout. Forma se tak při vytavování vosku v těchto místech rozpadá. Problém je řešen použitím keramických jader (Obr. 18). Ty zajistí přesné rozměry otvorů, drážek a dutin, kvalitní povrch a odolnost proti erozi kovu. Jádra umožňují vyrábět přesné odlitky se složitým tvarem dutin a otvorů, které by jinak bylo nemožné či velmi obtížné vyrobit.

Jádra se vyrábějí injekčním vstřikováním keramiky do forem. Poté se za vysoké teploty vypalují. Materiál se tak zhutní a získá požadované vlastnosti. Keramická jádra jsou vkládána do matečných forem před vstříknutím vosku. Stanou se tak součástí voskového modelu. Poté, co je model obalen, se vosk vytaví a jádra zůstávají součástí keramické formy.



Obr. 18 Jádro [30]

5.6 Nové trendy v oblasti výroby skořepin [11, 30, 31]

Snaha o co nejeekonomičtější a nejefektivnější výrobu vede slévárny k investicím do automatizace výrobních procesů. V dnešní době se upouští

od ručního obalování a přechází se na robotizované systémy (Obr. 19). Stromečky se uchytí na robotické rameno, které tyto stromečky za neustálého otáčení namáčí do obalové hmoty a následně nechává odkapat. Poté se stromeček posype žáruvzdorným materiálem a po vysušení se proces opakuje. Použití robotického ramene zajišťuje stejné provedení i časové intervaly všech operací. Také snižuje náklady na pracovní síly.



Obr. 19 Ukázka práce robotického ramene [19]

Dalším faktorem ovlivňujícím vývoj technologie přesného lití je snižování negativních dopadů na životní prostředí. Předpisy se neustále zpřísnují, což vede ke snaze najít využití pro již použité materiály nebo jejich recyklaci. Recyklace vosků je dnes již zcela běžná, ovšem v oblasti keramických skořepin doposud nebyla jejich recyklace uspokojivě vyřešena. Náklady na odstraňování použitých keramických skořepin se neustále zvyšují, proto je velmi pravděpodobné, že se v budoucnu najde způsob jejich alternativního využití bez nežádoucích dopadů na životní prostředí.

5.6.1 Rychle vyrobitelné skořepiny [32]

Výroba skořepin pro přesné lití trvá obvykle dva až čtyři dny. Samotná práce však zabere jen málo času. Většinu výrobní doby se skořepiny suší. To vedlo k zahájení studie zaměřené na zkrácení výrobního cyklu. Byly vyvinuty dva druhy skořepin. Výroba první skořepiny, směsi Fibercoat 229 (tavený křemen obohacený vlákny) a pojiva TMM35 (35% SiO_2) s 10% polymeru, trvá jeden den. Druhá skořepina, vyrobená ze štku obalovaného vysoce absorpčním organickým polymerem, má dobu výroby dokonce ještě kratší, nicméně nedosahovala takových vlastností jako skořepina první. Oba skořepinové materiály však byly zkoušeny na tvarově poměrně jednoduché součásti. Je třeba aby vývojové práce nadále pokračovaly v provozním měřítku a pro složitější součásti.

Výhodami této technologie jsou např.: zkrácení výrobní doby odlitku, možnost zvýšit objem výroby bez nutnosti rozšíření výrobních prostor, menší skladové zásoby apod.

5.6.2 Užití technologie RP na přímou výrobu skořepin a jader [22, 23, 33]

Technologie RP v oblasti vytavitelného modelu dává možnost nejen výrobu modelů ale také přímou výrobu keramických skořepin a jader. Jedním z postupů je metoda DSPC. Postup spočívá v nanášení vrstev korundového prášku, který je pojený koloidním oxidem křemičitým. Po zhotovení skořepiny nebo jádra (mohou se vyrábět současně) se odstraní volný prášek a skořepina nebo jádro se následně vypálí. Jedním z velkých problémů této metody je obtížné odstraňování přebytečného prachu z vnitřku složité skořepiny. S využitím rentgenu je možné zbytkový prach kontrolovat, je ale téměř nemožné zajistit jeho úplné odstranění.

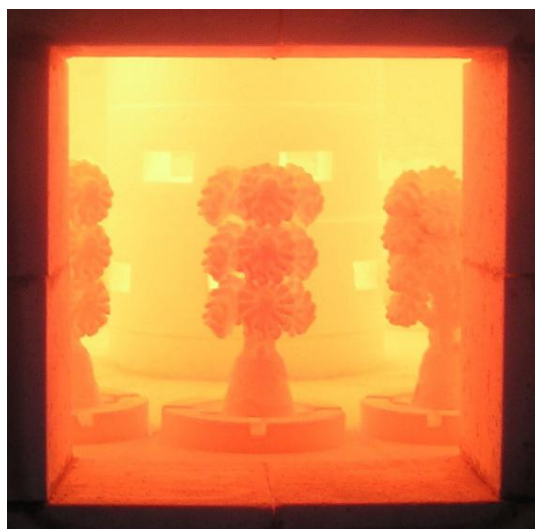
Stroje na přímou výrobu skořepin jsou však dnes příliš pomalé a používané materiály se nehodí pro složitou kombinaci materiálů skořepin, které poskytují požadovanou pevnost, propustnost a rychlost ochlazování. Přesto se však očekává, že vývoj v této oblasti bude pokračovat. Předností rychlé výroby „tiskem“ je možnost výroby modelů z různých materiálů, v každé vrstvě a při různé tloušťce stěn, což je běžnou metodou obalování nemožné.

Jedním z pokroků, který již byl v této oblasti dosažen, je možnost výroby keramické formy nebo jádra za pomoci anorganických pojiv. Velkou výhodou anorganických pojiv je, že jsou šetrná k životnímu prostředí. Oproti organickým pojivům nehoří během procesu odlévání a tím neprodukují emise, které jsou škodlivé pro životní prostředí. Zároveň mají pozitivní vliv na jakost odlitků.

6 ODLÉVÁNÍ [11]

Metoda vytavitelného modelu umožňuje odlévat širokou škálu slitin. Je to jeden z důvodů progresivnosti této technologie. Způsob lití nebo teplota slitiny při odlévání ovlivňují strukturu odlitky a tím jeho vlastnosti. Odlévání je proto velice důležitým procesem.

Samotný proces lití se provádí buď na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Při vakuovém lití se dosahuje vyšší kvality odlitku naopak nevýhodou je vyšší cena a nižší produktivita. Odlévat se může do předehřáté formy (700-800°C) (Obr. 20) z důvodu snížení teplotního šoku nebo do formy o teplotě okolí kde však hrozí její praskání.



Obr. 20 Předehřev forem [8]

6.1 Klasické lití

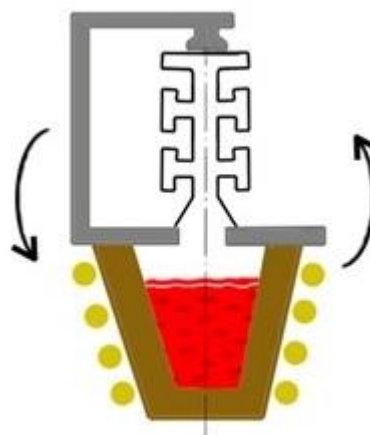
Do skořepiny umístěné na licím poli je za přístupu vzduchu vléván roztavený kov. Pro zatčení kov využívá pouze vlastní hmotnosti. Metoda je též známá jako gravitační lití (Obr. 21).



Obr. 21 Gravitační lití [15, 19]

6.2 Sklopné lití

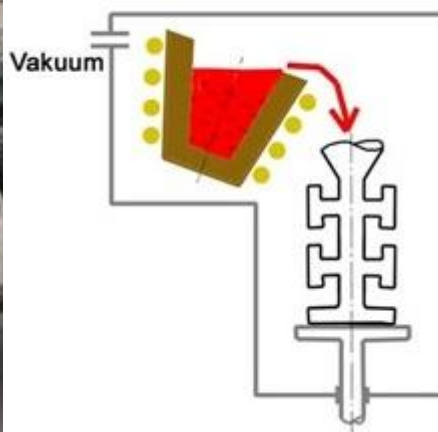
Kov je roztaven v otočné tavící peci na niž je připevněna forma. Nakloněním pece dojde k vyplnění formy kovem (Obr. 22).



Obr. 22 Sklopné lití [15, 34]

6.3 Tavení a lití ve vakuu

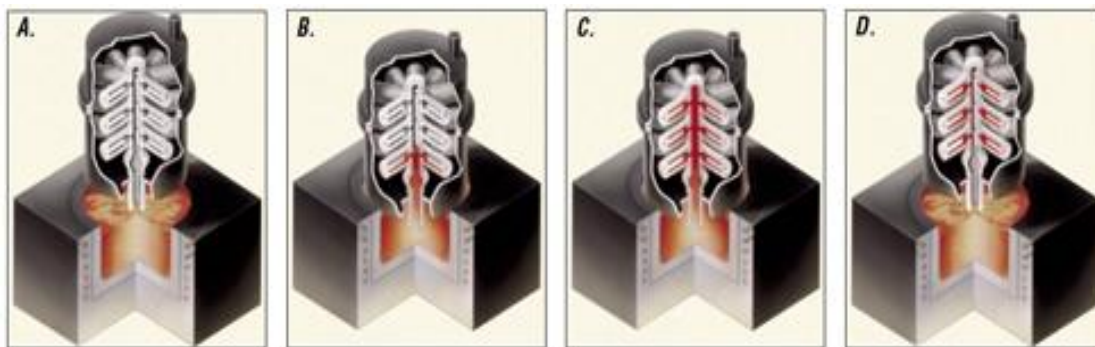
Kov se nataví ve vakuu a odlévá se za postupného snižování podtlaku (Obr. 23).



Obr. 23 Vakuové lití [15, 19]

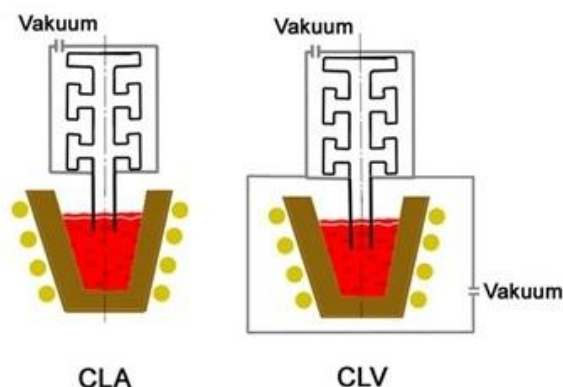
6.4 Vakuové nasávání [11, 35]

Forma je umístěná nad kelímkem s roztaveným kovem, který se do skořepiny nasaje pomocí podtlaku. Po naplnění formy odlitky začnou tuhnout, zatímco kov ve vtokovém kůlu zůstává roztavený. Po uvolnění podtlaku se proto vrací zpět do kelímku pro opětovné použití (Obr. 24).



Obr. 24 Vakuové nasávání [35]

Rozlišujeme dva způsoby vakuového nasávání: CLA a CLV (Obr. 25). Rozdíl je že při metodě CLV se kov taví ve vakuu zatím co při metodě CLA nikoliv.



Obr. 25 Schéma CLA a CLV [15]

7 DOKONČOVACÍ OPERACE [11, 36]

Po odlití a zchladnutí kovu je nutné odstranit keramickou skořepinu, oddělit odlitky od vtokové soustavy, zabrousit nerovnosti a provést následnou kontrolu odlitku.

7.1 Odstraňování keramiky na hrubo

První operací po zchladnutí odlitku je odstranění keramické skořepiny, která je z odlitku mechanicky oklepávána. Jednou z možností je využití pneumatického kladiva. Tato operace je velmi hlučná a je doprovázena vysokou prašností. Proto je odlitek uzavřen do zvukotěsné a prachotěsné komory opatřené odsáváním. Pneumatické kladivo pracuje na principu vibračního oklepávání, které má za následek opadání většiny skořepiny (Obr. 26). U velkých a neforemných odlitků se skořepina odstraňuje ručně pomocí kladiva.

Novou možností odstranění skořepiny je využití vysokotlakého vodního paprsku.



Obr. 26 Proces oklepávání skořepiny v pneumatickém kladivu [37]

7.2 Oddělení odlitků od vtokové soustavy

Následující operací je oddělení odlitků od vtokové soustavy, které se provádí pomocí kotoučových nebo rozbrušovacích pil (Obr. 27). Ve výjimečných případech se mohou odlitky urazit ručně pomocí hliníkové palice. Tento postup se používá pouze u odlitků s nižší přidanou hodnotou, které jsou vhodně uchyceny na vtokovou soustavu.



Obr. 27 Rozbrušovací pila s rotačním sklíčidlem [37]

7.3 Odstranění zbylé keramiky

Jakmile je odřezán vtokový systém, je třeba odstranit zbytky keramické skořepiny zachycené ve špatně přístupných místech. Pro tuto operaci je možné využít dvě základní metody: abrazivní a chemické.

Abrazivní metody lze dělit na tryskání tlakové, které jako médium využívá vzduch nebo vodu a na tryskání bez použití vzduchu, při kterém jsou abrazivní částice na odlitky vrhány pomocí lopatkového kola (Obr. 28).



Obr. 28 Ukázka tryskacích zařízení [19,37]

Chemické metody spočívají v ponořování odlitků do chemické lázně, kde dochází k odstranění zbylé skořepiny. Podle obsahu můžeme lázně dělit na lázně s rozpuštěnou solí, která se skládá z rozpuštěného hydroxidu sodného a dalších aditiv a horkou vodní žíravou lázeň, která využívá hydroxidu sodného při teplotě 80°C.

7.4 Odstranění vtoků, dokončování

Po úplném očištění odlitku se provádí dokončovací operace, mezi které patří odstranění vtoků, zabroušení povrchových vad a nerovností, leštění a omílání (Obr. 29). Někdy je nutné zařadit mezi dokončovací operace tepelné zpracování či obrobení odlitku.



Obr. 29 Omílač [19]

7.5 Kontrola odlitků [38, 39, 40]

Odlitky se kontrolují různými metodami. Patří mezi ně například:

- **Vizuální zhodnocení** – časově nenáročná a levná defektoskopická metoda. Kontrola se provádí pouhým okem, lupou či pomocí endoskopů, včetně systémů s malými kamerami a osvětlením.
- **Kapilární defektoskopie** – nedestruktivní metoda používaná k určení povrchových trhlin a necelistvostí. Po nanesení kapaliny na testovaný objekt dojde k jejímu zachycení v trhlínách, což indikuje jeho defekt.
- **Měření spektrometrem** – rychlá, nedestruktivní analýza chemického složení materiálů založena na rozdílné absorpci monochromatického záření různými prvky. Záření je zachyceno fotocitlivým snímačem, který vyhodnotí počet, druh a obsah prvků v kovu (v %) (Obr. 30).
- **Rentgen** – nedestruktivní metoda založená na prozařování materiálu ionizačním zářením s následným vyhodnocením snížení intenzity záření při průchodu odlitkem. Intenzita záření je rozdílná v reakci na strukturní povrchové nebo vnitřní materiálové defekty či změny tloušťky materiálu.
- **Ultrazvuk** – nedestruktivní metoda spočívající ve změnách propustnosti a odrazech ultrazvukové vlny v důsledku necelistvosti materiálu (Obr. 31).
- **Metalografie** – destruktivní defektoskopická metoda. „*Jejím cílem je zviditelnění struktury materiálu a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu*“ [39].
- **Kontrola mechanických vlastností** – destruktivní defektoskopické metody, při nichž se vyhodnocují mechanické vlastnosti materiálu. Patří sem například zkoušky pevnosti v tahu, tažnosti či tvrdosti.

Samozřejmě se také kontrolují základní rozměry odlitku pomocí klasických měřidel (šuplery, kalibrů či komparačních měřidel) (Obr. 32)



Obr. 30 Spektrometr [41]



Obr. 31 Ultrazvuk [38]



Obr. 32 Měření odlitku [42]

ZÁVĚR

Cílem předkládané bakalářské práce bylo vypracování literární rešerše zaměřené na technologii vytavitelného modelu v současnosti. Práce obsahuje popis celého procesu výroby odlitku včetně materiálů používaných na výrobu matečných forem, voskových modelů i keramických skořepin. Důraz je kladen na nejnovější technologie používané v průběhu celého procesu výroby, jako je například Rapid Prototyping, pokrokové metody zkoušení vosků či automatizovaná pracoviště.

Technologie vytavitelného modelu je v dnešní době jedním z nejrychleji se vyvíjejících metod lití. Umožňuje vyrábět odlitky dosahující vysoké přesnosti rozměrů a takové kvality povrchu, že často není nutné odlitek dále obrábět, a to i u tvarově složitých nebo tenkostěnných součástí. Takto vyrobené produkty jsou využívány celou řadou oborů lidské činnosti jako je například letecký a automobilový průmysl, energetika, zbrojní průmysl, lékařství a mnoho dalších.

Ačkoliv se jedná o rychle se rozvíjející metodu, proto, aby byla konkurenceschopná, je nutné stále dbát na vývoj a modernizaci jednotlivých etap technologie přesného lití. V důsledku neomezeného čerpání přírodních zdrojů může v budoucnu docházet k nedostatku či zdražení klíčových surovin, proto už dnes dochází ke zkoumání alternativních materiálů a pokusům o efektivní recyklaci surovin. Důraz na lidské zdraví a kvalitu životního prostředí také ovlivňuje proces výroby, který se tak musí přizpůsobovat, aby vyhověl stále se zpřísňujícím normám. Pro zachování stejné kvality konečného produktu je nutná stálá opakovatelnost výroby. Tato skutečnost vede ke snaze o automatizování jednotlivých etap procesu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORÁČEK, Milan. *Technologie vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.
- [2] PAVELKA, Miroslav. *Užitné vlastnosti lití vytavitelným modelem*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. Říjen 2001, XLIX, 10, s. 581-584. ISSN 0037-6825.
- [3] WILLIAMS, Ron; HORÁČEK, Milan; HIRST, Richard. *Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2012, LX, 9-10, s. 319-322. ISSN 0037-6825.
- [4] Česká zbrojovka a.s. [online]. 2009 – 2014 [cit 2014-05-15]. *Přesné odlitky*. Dostupné z WWW: <<http://www.czub.cz/cz/catalog/293-ostatni/OP-OP/CZ-presne-odlitky.aspx>>
- [5] PBS Velká Bíteš, a.s. [online]. 2000 - 2014 [cit 2014-04-30]. *Výrobní program Divize přesného lití*. Dostupné z WWW: <<http://www.pbsvb.cz/vyrobní-program-divize-presneho-liti>>
- [6] Jizdnikola.net [online]. 2008 – 2014 [cit 2014-05-10]. *Klasické pedály na jízdní kola*. Dostupné z WWW: <<http://www.jizdnikola.net/klasicke-pedaly-na-jizdni-kola-a2481>>
- [7] KDYNIIUM a.s. [online]. 2014 [cit 2014-05-15]. *Odlitky pro potravinářský průmysl*. Dostupné z WWW: <<http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p3>>
- [8] PBS Velká Bíteš, a.s - Soukromý fotoarchiv DPL (autor: Ing. Petr Ňuksa). [cit 2014-05-10].
- [9] BRAUNOVINY [online]. 2014 [cit 2014-05-12]. *Columbus UC – primární implantát při náhradě kolenního kloubu*. Dostupné z WWW: <<http://braunoviny.bbraun.cz/clanky/columbus-uc-primarni-implantat-pri-nahrade-kolenního-kloubu/>>
- [10] FIMES a.s. [online]. 2013 [cit 2014-04-30]. *Produkty*. Dostupné z WWW: <<http://www.fimes.mesit.cz/cs/art/229-produkty>>
- [11] SOUKUPOVÁ, Lucie. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství*, 2011. 56 s.
- [12] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2009. 30 s. Dizertační práce. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelný%20model.pdf>>.
- [13] MCAE – 3D digitální technologie [online]. 2014 [cit 2014-04-26]. *Vakuové lití*. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/vakuove-liti>>.

[14] MACKŮ, Martin, HORÁČEK, Milan. *Možnosti metod RP v kombinaci s technologií vytavitelného modelu*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2012, LX, 9-10, s. 323-328. ISSN 0037-6825.

[15] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2010 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.

[16] KOSOUR, Vojtěch, HORÁČEK, Milan, HORENSKÝ, Jiří. *Kvalitní voskový model – základní předpoklad kvalitního odlitku zhotoveného metodou vytavitelného modelu*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2012, LX, 9-10, s. 329-331. ISSN 0037-6825.

[17] TALANDA, Ivan, HORÁČEK, Milan, JEDOVNICKÝ, Jan. *Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu Fimes, a. s.* Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2012, LX, 9-10, s. 332-336. ISSN 0037-6825.

[18] HIRST, Richard. *Composition, control and use of Investment Casting wax*. [online]. 2009 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/>>.

[19] PBS Velká Bíteš, a.s. *PBS Velká Bíteš*. Propagační prezentace firmy. Velká Bíteš, 2013 [cit. 2014-04-30].

[20] BOND, David, MORSON, David, HANCOCK, Phil, HORÁČEK, Milan. *Pokroky při testování vosků ovlivňující jejich další rozvoj*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2012, LX, 9-10, s. 337-341. ISSN 0037-6825.

[21] Technische Universität Braunschweig [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. *Kalorimetrie*. Dostupné z WWW: <<https://www.tu-braunschweig.de/ifw/forschung/abgeschlossen/trafokin/kalorimetrie>>.

[22] ČEJKA, Libor. *Aplikace metod Rapid Prototyping ve slévárenské technologii lití na vytavitelný model*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s.

[23] WIMPENNY, David. *Použití technologie Rapid Prototyping v oblasti přesného lití*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2005, LIII, 1, s. 29-34. ISSN 0037-6825.

[24] PBS Velká Bíteš, a.s. [online]. 2000, 2014 [cit. 2014-04-28]. *Technologie Rapid prototyping*. Dostupné z WWW: <<http://www.pbsvb.cz/technologie-rapid-prototyping>>.

[25] ŠTIPL, P. *Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 47 s.

[26] SOUKUPOVÁ, L. *Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 95 s.

[27] MAZŮREK, T. *Optimalizace skořepinové formy při výrobě odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 86 s.

[28] ŠMÍD, J. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti – problematika forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s.

[29] ŠMÍD, Michal. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti – vytavování vosku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s. 35.

[30] FORD, David. *Future Trends in Investment Casting – Drivers for Development*. [online]. 2009 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/>>.

[31] INVESTACAST [online]. 2014 [cit 2014-04-28]. *Ceramic Shell Making*. Dostupné z WWW: <http://www.investacast.com/ceramic_shell_making.aspx>

[32] BRANSCOMB, Tom. *Studie zkoumá možnosti nových alternativních skořepin vyrobených během jedné směny*. Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl. 2008, LVI, 9-10, s. 431-432. ISSN 0037-6825.

[33] Foundry-planet.com [online]. 2004, 2014 [cit 2014-04-28]. *Environmentally friendly 3D printing*. Dostupné z WWW: http://www.foundry-planet.com/index.php?id=87&tx_ttnews%5Byear%5D=2011&tx_ttnews%5Bmonth%5D=08&tx_ttnews%5Bday%5D=04&tx_ttnews%5Btt_news%5D=11045&cHash=5f7a1d9b9f5ccb87b9383db9f4da9ef7>.

[34] INVESTACAST [online]. 2014 [cit 2014-05-12]. *Metal casting*. Dostupné z WWW: <<http://www.investacast.com/Portals/0/images/rolloverFurnace.jpg>>

[35] HITCHINER Manufacturing Co. [online]. 2012 [cit 2014-05-15]. *Countergravity casting*. Dostupné z WWW: <<http://www.hitchiner.com/countergravity-casting.html#>>

[36] DOŠKÁŘ, Josef, et al. *Výroba přesných odlitků*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. 313 s. DT 621.746.

[37] PBS Velká Bíteš, a.s – *Fotografická dokumentace z exkurze ve výrobě*. (autor: Roman Matoušek). [cit 2014-05-12].

[38] NDT servis [online]. 2008 [cit 2014-05-25]. *Defektoskopie v průmyslu*. Dostupné z WWW: <<http://www.ndt.cz/>>

[39] Vysoká škola chemicko – technická v Praze [online]. 2009 - 2014 [cit 2014-05-25]. *Metalografie I. – příprava vzorku pro pozorování mikroskopem*. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fmmetalografie1/teorie.htm>>

[40] MAZŮREK, T. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 43 s.

[41] HUKOS s.r.o. [online]. 2014 [cit 2014-05-20]. *XRF – rentgenové analyzátoři*. Dostupné z WWW: <<http://www.hukos.cz/spektrometry/xl2>>

[42] Slévárna Anah Prostějov s.r.o. [online]. 2009 [cit 2014-05-26]. *Systém kvality*. Dostupné z WWW: <<http://www.slevarna-anah.cz/>>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Odlitek hřebenu ze zlata (300g - 4. stol. n. l.) [1]
- Obr. 2 Ukázka odlitků vyrobených technologií vytavitelného modelu [4-10]
- Obr. 3 Stručný přehled operací v technologii vytavitelného modelu [1]
- Obr. 4 Obráběná forma [8]
- Obr. 5 Princip výroby formy metalizací [15]
- Obr. 6 Princip výroby formy galvanoplastikou [15]
- Obr. 7 Voskové směsi [18]
- Obr. 8 Vstřikovací lis [19]
- Obr. 9 Model lopatkového kola s vtokem [8]
- Obr. 10 a 11 Ukázky stromečků [8]
- Obr. 12 Schéma DSC [21]
- Obr. 13 Schéma reometrie [20]
- Obr. 14 Namáčení stromečku [19]
- Obr. 15 Sušení skořepin [8]
- Obr. 16 Dilatační spára [8]
- Obr. 17 Bojlerkláv [8]
- Obr. 18 Jádru [30]
- Obr. 19 Ukázka práce robotického ramene [19]
- Obr. 20 Předehřev forem [8]
- Obr. 21 Gravitační lití [15, 19]
- Obr. 22 Sklopné lití [15, 34]
- Obr. 23 Vakuové lití [15, 19]
- Obr. 24 Vakuové nasávání [35]
- Obr. 25 Schéma CLA a CLV [15]
- Obr. 26 Proces oklepávání skořepiny v pneumtickém kladivu [37]
- Obr. 27 Rozbrušovací pila s rotačním sklíždlem [37]
- Obr. 28 Ukázka tryskacích zařízení [19,37]
- Obr. 29 Omílač [19]
- Obr. 30 Spektrometr [41]
- Obr. 31 Ultrazvuk [38]
- Obr. 32 Měření odlitku [42]

SEZNAM GRAFŮ

- Graf 1 Historický přehled odlitků technologie vytavitelného modelu [1]
- Graf 2 Prodej přesných odlitků podle regionů v roce 2011 [3]
- Graf 3 Podíl jednotlivých sléváren v ČR na prodeji odlitků v roce 2011 [3]